

# Αλγοριθμικές Τεχνικές και Εφαρμογές

## 1<sup>η</sup> εργασία

Στόχος της εργασίας είναι η εξοικείωση με βασικές παράλληλες αλγοριθμικές τεχνικές και την υλοποίησή τους σε συστήματα κατανεμημένης μνήμης. Συγκεκριμένα θα πρέπει να υλοποιήσετε έναν αλγόριθμο προσομοίωσης κυκλοφορίας με αυτόματα κυψελών (Cellular Automata, CA) με χρήση του προγραμματιστικού μοντέλου MPI.

### **Το πρόβλημα (1,5 μονάδα)**

Οι προσομοιώσεις κυκλοφορίας με αυτόματα κυψελών (Cellular Automata, CA) είναι μια απλή, αλλά ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για τη μελέτη της δυναμικής της κυκλοφορίας σε διάφορα οδικά περιβάλλοντα. Η βασική ιδέα στηρίζεται στη διακριτοποίηση τόσο του χώρου όσο και του χρόνου, με τον δρόμο να χωρίζεται σε μικρά τμήματα (κυψέλες). Κάθε κυψέλη μπορεί να είναι είτε κενή, είτε κατειλημμένη από ένα όχημα. Η κίνηση των οχημάτων στο οδικό δίκτυο πραγματοποιείται με βάση ένα σύνολο κανόνων που εξαρτώνται από την κατάσταση των γειτονικών κυψελών, κάνοντας το σύστημα κατάλληλο για την προσομοίωση ρεαλιστικών καταστάσεων κυκλοφορίας.

Η απλότητα αυτής της μεθόδου επιτρέπει την αποδοτική μοντελοποίηση σύνθετων φαινομένων, όπως η συμφόρηση, οι κυματομορφές μποτιλιαρίσματος, η αλληλεπίδραση μεταξύ οχημάτων σε κόμβους και η δυναμική της κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομους και αστικά δίκτυα. Επιπλέον, τα αυτόματα κυψελών μπορούν να παραλληλοποιηθούν σχετικά εύκολα, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για τη μελέτη μεγάλων δικτύων οδικής κυκλοφορίας σε προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας. Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα για τη μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με την ανάλυση και τη βελτίωση της κυκλοφορίας.

Μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές αυτής της προσέγγισης είναι το μοντέλο Nagel-Schreckenberg, το οποίο αποτελεί ένα από τα πρώτα στοχαστικά μοντέλα αυτόματων κυψελών για την κυκλοφορία. Το μοντέλο αυτό εισάγει έναν μικρό βαθμό τυχαιότητας στη συμπεριφορά των οχημάτων, προσομοιώνοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική κυκλοφοριακή ροή. Για παράδειγμα, ενσωματώνει φαινόμενα όπως η απρόσμενη επιβράδυνση, η οποία μπορεί να προκαλεί μποτιλιάρισμα, ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής κυκλοφορίας. Οι απλοί αλλά ισχυροί κανόνες του μοντέλου επιτρέπουν τη μελέτη θεμελιωδών φαινομένων, όπως η μετάβαση από ελεύθερη ροή σε συμφόρηση και η δυναμική δημιουργία κυκλοφοριακών κυμάτων.

Η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα των αυτόματων κυψελών τα καθιστούν βασικό εργαλείο για τη μελέτη της κυκλοφορίας σε διάφορα επίπεδα. Εφαρμόζονται σε ποικίλα προβλήματα, από τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε πολυσύχναστους αυτοκινητόδρομους έως τη βελτιστοποίηση της ροής στα αστικά δίκτυα. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων συμβάλλουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της κυκλοφορίας και στην ανάπτυξη στρατηγικών για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και της αποδοτικότητας.

## Ο Αλγόριθμος Nagel-Schreckenberg

Ο αλγόριθμος Nagel-Schreckenberg περιγράφει ένα απλό αλλά ισχυρό στοχαστικό μοντέλο αυτόματων κυψελών για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής. Το μοντέλο αυτό προτείνει έναν τρόπο να αναπαρασταθεί η κίνηση οχημάτων σε έναν δρόμο με μια μόνο λωρίδα, χρησιμοποιώντας διακριτά χρονικά και χωρικά βήματα. Το μοντέλο λειτουργεί με βάση ένα μονοδιάστατο πλέγμα, όπου κάθε κυψέλη μπορεί να είναι είτε κενή είτε κατειλημμένη από ένα όχημα, και κάθε όχημα έχει μια ταχύτητα που κυμαίνεται από 0 έως μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή  $v_{max}$ . Ο αλγόριθμος ακολουθεί τα παρακάτω βασικά βήματα:

1. **Αρχικοποίηση:** Ο δρόμος αναπαρίσταται ως μια συστοιχία κυψελών. Κάθε κυψέλη είναι είτε άδεια είτε κατειλημμένη από ένα όχημα, το οποίο έχει μια αρχική ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή είναι ακέραιος αριθμός που περιορίζεται από τη μέγιστη ταχύτητα  $v_{max}$ .
2. **Κανόνες Ενημέρωσης:**
  - **Επιτάχυνση:** Κάθε όχημα προσπαθεί να αυξήσει τη ταχύτητά του κατά 1 μονάδα κάθε φορά, φτάνοντας τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή  $v_{max}$ , εφόσον αυτό είναι δυνατό.
  - **Αποφυγή Συγκρούσεων:** Εάν η απόσταση από το προπορευόμενο όχημα είναι μικρότερη από την τρέχουσα ταχύτητα του οχήματος, η ταχύτητα μειώνεται ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα προκληθεί σύγκρουση.
  - **Στοχαστική Επιβράδυνση:** Με πιθανότητα  $p$ , το όχημα μειώνει τη ταχύτητά του κατά 1 μονάδα, εισάγοντας τυχαιότητα στο σύστημα. Αυτό προσομοιώνει ρεαλιστικές συνθήκες, όπως ανθρώπινα λάθη ή εξωτερικούς παράγοντες.
  - **Μετακίνηση:** Τα οχήματα μετακινούνται στις νέες τους θέσεις στον δρόμο, όπως ορίζεται από την υπολογισμένη ταχύτητα.
3. **Επανάληψη:** Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται επαναληπτικά για κάθε χρονικό βήμα, προσομοιώνοντας την κυκλοφοριακή ροή σε μακροχρόνια κλίμακα.

Το μοντέλο Nagel-Schreckenberg έχει αποδειχθεί εξαιρετικά χρήσιμο για την κατανόηση φαινομένων όπως η μετάβαση από ελεύθερη ροή σε συμφόρηση και η δημιουργία κυκλοφοριακών κυμάτων. Η στοχαστικότητα, που εισάγεται μέσω της πιθανότητας επιβράδυνσης, προσθέτει ρεαλισμό στο μοντέλο, ενσωματώνοντας τη φυσική αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει την ανθρώπινη συμπεριφορά κατά την οδήγηση. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει τη μελέτη καταστάσεων, όπως ξαφνικές επιβραδύνσεις ή μποτιλιαρίσματα που προκαλούνται από μικρές διαταραχές.

Στο πλαίσιο της εργασίας θα ασχοληθείτε με μια επέκταση του παραπάνω μοντέλου, το οποίο υποθέτει δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Στο μοντέλο δύο λωρίδων, προστίθενται κανόνες για τη δυναμική αλλαγής λωρίδας, κάτι που δεν υπάρχει στο μοντέλο μίας λωρίδας. Οι κανόνες αυτοί περιλαμβάνουν:

1. **Κριτήριο Ασφαλείας:** Ένα όχημα μπορεί να αλλάξει λωρίδα μόνο αν η νέα λωρίδα διαθέτει επαρκή απόσταση μπροστά και πίσω από το όχημα για να αποφευχθεί σύγκρουση.
2. **Κριτήριο Οφέλους:** Εξασφαλίζει ότι η αλλαγή λωρίδας θα προσφέρει καλύτερες συνθήκες, όπως αυξημένη ταχύτητα ή αποφυγή μποτιλιαρίσματος.
3. **Περιορισμός Επιστροφής:** Αποτρέπει ένα όχημα από το να επιστρέψει αμέσως στη λωρίδα από την οποία μόλις αποχώρησε. Αυτές οι προσθήκες επιτρέπουν τη μοντελοποίηση ρεαλιστικότερων καταστάσεων κυκλοφορίας, όπως η προσπέραση ή η προσαρμογή σε λωρίδες με διαφορετικά επίπεδα συμφόρησης.

Σας δίνεται η περιγραφή του μοντέλου δύο λωρίδων (2-lane-model.pdf) και ένα σειριακό πρόγραμμα σε C++, το οποίο υλοποιεί τον αλγόριθμο. Μελετήστε το αρχείο README.txt για να δείτε πως θα μεταγλωττίσετε και πως θα εκτελέσετε το πρόγραμμα. Σας ζητείται να αναπτύξετε μια παράλληλη έκδοση του αλγορίθμου και να την υλοποιήσετε με χρήση του προγραμματιστικού μοντέλου MPI, χρησιμοποιώντας ως βάση το σειριακό πρόγραμμα που σας δίνεται. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να καταναείμετε τμήματα του δρόμου μεταξύ διεργασιών MPI και να ενημερώνετε τις διεργασίες MPI (μέσω ανταλλαγής της κατάλληλης πληροφορίας) ότι ένα αυτοκίνητο κατά την κίνηση του πέρασε στην περιοχή του δρόμου που διαχειρίζεται η κάθε διεργασία. Για την παραλληλοποίηση θα πρέπει να δώσετε βάση ιδιαίτερος στην συνάρτηση `run_simulation()` στο αρχείο `Simulation.cpp`.

Για να ελέγχετε την επίδοση του προγράμματος σας, εκτελέστε το για διαφορετικούς συνδυασμούς μήκους δρόμου, πλήθος χρονικών βημάτων προσομοίωσης και πλήθους διεργασιών (1, 2, 4, 8, ...). Για κάθε συνδυασμό δημιουργήστε ένα γράφημα με τους χρόνους εκτέλεσης για τα διαφορετικά πλήθη διεργασιών.

Στο αρχείο `cats-input.txt` περιέχονται οι παράμετροι της προσομοίωσης. Το μήκος του δρόμου βρίσκεται στην δεύτερη γραμμή, ενώ το πλήθος των χρονικών βημάτων προσομοίωσης βρίσκεται στην έκτη γραμμή. Δείτε και το αρχείο `Inputs.cpp`, το οποίο διαβάζει το αρχείο `cats-input.txt` κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Τέλος, βεβαιωθείτε για την ορθότητα των αποτελεσμάτων του παράλληλου προγράμματος σας συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα του σειριακού προγράμματος.

### Παραδοτέα

Η εργασία θα παραδοθεί μέσω της πλατφόρμας Thales (<https://thales.cs.unipi.gr>). Πέρα από τον κώδικα των εφαρμογών που θα αναπτύξετε, η εργασία θα πρέπει να περιλαμβάνει και αναλυτική τεκμηρίωση των τεχνικών που ακολουθήσατε στην υλοποίηση, συμπεριλαμβανομένου και ενός ψευδοκώδικα όπου θα συνοψίζεται η βασική δομή των προγραμμάτων σας.

Η εργασία μπορεί να εκπονηθεί από ομάδα **μέχρι 2 ατόμων** και θα πρέπει να παραδοθεί έως την **Τετάρτη 08/01/2025**.